KALORIMETRISCHE ENERGIESTROM- UND ABSORPTIONSMESSUNGEN MIT Co-60 GAMMASTRAHLEN

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

der

Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät

der Freien Universität Berlin

vorgelegt von

Bernhard Rassow

aus Berlin

1965

Druck:

ERNST-REUTER-GESELLSCHAFT
der Förderer und Freunde der Freien Universität Berlin e.V.

DISSERTATIONS-DRUCKSTELLE

1 Berlin 33, Garystr. 45

KALORIMETRISCHE ENERGIESTROM- UND ABSORPTIONSMESSUNGEN MIT Co - 60 GAMMASTRAHLEN

Inaugural - Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

der

Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät

der Freien Universität Berlin

ACAD.
LUGD. BAT.
BIBL.

vorgelegt von

Bernhard Rassow

aus Berlin

1. Referent: Prof. Dr. H. Lassen
2. Referent: Prof. Dr. R. Honerjäger

Tag der mündlichen Prüfung: 18. Dezember 1964

Tag der Promotion: 27. Feb. 1965

Inhaltsverzeichnis

		Seite
Einleitung		1
Kapitel 1:	Allgemeines zur Kalorimetrie	3
Kapitel 2:	Aufbau des Kalorimeters	5
Kapitel 3:	Temperaturmessung	
	3.1 Temperaturkonstanz des Wasserbades	7
	3.2 Temperaturkonstanz der Absorber	7
	3.3 Temperaturmeßbrücke	11
	3.4 Temperaturmeßwiderstände (NTC)	13
	3.5 Elektrische Eichung	17
Kapitel 4:	Experimentelle Ergebnisse	
	4.1 Allgemeines zur Durchführung der Messungen	18
	4.2 Abhängigkeit der Meßergebnisse vom Ort der Temperaturmessung und vom Durchmesser der Heizwendel	20
	4.3 Energierückstreuung	21
	4.5 Messung der einfallenden Energie und Bestimmung der Absorptionskoeffizienten von Blei und Quecksilber	27
	4.6 Messungen mit Wasser	31
Zusammenfassung		35
Anhang:	Aufbau und elektrische Schaltung zum Bleitresor für ein Kobalt-60-Präparat der Aktivität von ca. 50 Curie	37
Literaturverzeichnis		40

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41546516_0070

Einleitung

Bei der Messung energiereicher Photonenstrahlung wird trotz einiger meßtechnischer Nachteile immer wieder das Kalorimeter benutzt, da es von allen bisher bekannten Meßgeräten das einzige ist, das eine direkte und von der Energie der Strahlung unabhängige Anzeige des Energiestromes liefert. Diese absolute Kenntnis wird einmal in der Dosimetrie benötigt, wenn es darum geht, Dosismeßgeräte über einen großen Energiebereich zu eichen, und zum anderen in der Kernphysik, wenn absolute Wirkungsquerschnitte bestimmt werden sollen. Kalorimetrische Messungen sind in den vergangenen Jahren mit Bremsstrahlungen von Elektronen-Beschleunigern bei Werten für E_{max} von 10 bis 300 MeV durchgeführt worden. Die dabei benutzten Kalorimeter lassen den zu messenden Energiestrom durch ein Fenster mit geringer Absorption auf einen im Innern befindlichen Absorber fallen, dessen Temperaturerhöhung dann gemessen wird [12], [13], [14], [15].

Daneben sind auch Kalorimeter zur Aktivitätsbestimmung radioaktiver Präparate entwickelt worden. Bei diesen wird die Strahlungsquelle - also das radioaktive Präparat - zur besseren Ausnutzung des meist geringen Energiestromes in das Zentrum des Absorbers gebracht [16], [17], [18].

Das hier verwendete Kalorimeter ist für Bremsstrahlungsmessungen vorgesehen und arbeitet deshalb nach dem ersten Prinzip, obgleich die hier berichteten Untersuchungen an einem radioaktiven Präparat als Strahlungsquelle durchgeführt wurden.

Der oben genannte Vorteil der direkten und energieunabhängigen Messung muß bei genauerer Betrachtung jedoch etwas eingeschränkt werden. Es muß vorausgesetzt werden, daß keine chemischen Umwandlungen und keine Kristallstrukturänderungen im Absorber auftreten, da sonst Energiebeträge verbraucht werden können, die nicht zur Erwärmung beitragen. Weiterhin muß entweder eine völlige Absorption der einfallenden Strahlung gewährleistet sein, oder es müssen die auftretenden Energieverluste korrigiert werden. Nun lassen sich zwar durch Vergrößern des Absorbers diese Verluste beliebig klein halten, jedoch wächst dabei die Wärmekapazität des

Absorbers so stark an, daß die nachzuweisende Erwärmung sehr gering und dadurch die Messung sehr ungenau wird. Untersuchungen über die Energieverluste sind für E_{max} = 85, 170 und 300 MeV von KRUGLOV und LOPATIN [6] und von PRUITT und DOMEN [19] durchgeführt worden. Ein wesentliches Ziel dieser Arbeit ist es, für die Energie der Co-60-Strahlung (Mittelwert 1,25 MeV) diese Verluste zu bestimmen und die optimalen Absorberdimensionen zu finden. Dazu ist es zuvor nötig zu klären, ob innerhalb des Absorbers eine konstante Temperatur herrscht, und welche Verluste durch Rückstreuung an der Vorderfläche des Absorbers auftreten können. Alle diese Untersuchungen wurden an Absorbern aus Blei durchgeführt, das auf Grund seiner leichten Bearbeitungsmöglichkeit, seines großen Absorptionsvermögens, seiner kleinen Wärmekapazität und seiner hohen Wärmeleitzahl von allen Autoren* immer wieder benutzt wird. In den letzten Eigenschaften liegt Quecksilber noch etwas günstiger als Blei und wird hier deshalb ebenfalls zu Energiestrom-Messungen herangezogen.

Der Energiestrom wird gefunden, indem von den Ergebnissen mit Absorbern verschiedener Länge auf das Ergebnis mit einem Absorber unendlicher Länge geschlossen wird. Dies meßtechnisch aufwendige Verfahren erlaubt eine bessere Bestimmung des Energiestroms als bei der Benutzung einer festen Absorberlänge möglich ist. Außerdem können nach dieser Methode die Absorptionskoeffizienten der verwendeten Absorbermaterialien bestimmt werden. Im Gegensatz zu den Messungen mit Bremsstrahlungen war wegen der Verwendung eines radioaktiven Präparates hier der Energiestrom bekannt. Es konnten daher die kalorimetrisch gefundenen Werte überprüft werden.

Weiterhin wird über einen Versuch, die Tiefendosiskurve von Kobalt-60-Strahlung in Wasser kalorimetrisch zu bestimmen, berichtet. Bevor auf diese Messungen eingegangen wird, wird das Prinzip und der Aufbau des Kalorimeters beschrieben.

---

*Eine Literaturübersicht, die die meisten bis 1962 erschienenen Arbeiten erfaßt, geben LE PAPE und ENGELMANN [1]

1. Allgemeines zur Kalorimetrie

Das Meßprinzip des Kalorimeters besteht darin, daß die einfallende Strahlungsenergie von einem Absorber völlig absorbiert wird und die dadurch bewirkte Temperaturerhöhung gemessen wird. In der praktischen Ausführung müssen dabei zwei verschiedene Methoden der Messung dieser Temperaturerhöhung unterschieden werden.

1. Das adiabatische Kalorimeter
Die einfallende Energie E_s trifft den Absorber der Masse M_A, der sich ständig auf der gleichen Temperatur wie das Kalorimetergehäuse G befindet. Dies wird dadurch erreicht, daß die Temperatur des Gehäuses durch eine von außen zugeführte Energie der Absorbertemperatur ständig angeglichen wird. Für die Temperaturänderung ΔT gilt dann

$$E_s = M_A \cdot c_A \cdot \Delta T \ , \qquad (1)$$

wobei c_A die spezifische Wärme des Absorbermaterials ist. Bei diesem Verfahren treten zwar keinerlei thermische Verluste auf, jedoch ist es meßtechnisch sehr aufwendig, da die Angleichung der Gehäusetemperatur auf ein Bruchteil der eintretenden Temperaturerhöhung genau und praktisch trägheitslos erfolgen muß.

2. Das isotherme Kalorimeter
Beim isothermen Kalorimeter wird die Temperatur des Gehäuses T_G durch ein Thermostatbad konstant gehalten. Zu Beginn der Bestrahlung sei die Temperatur des Absorbers T_A. Die Temperaturänderung dT_A des Absorbers ist dann gegeben durch

$$M_A \cdot c_A \cdot dT_A = [A_s - \frac{1}{R}(T_A - T_G)]dt \ . \qquad (2)$$

Hier bezeichnet t die Zeit und A_s den Energiestrom. Der zweite Term auf der rechten Seite von Gleichung (2) beschreibt jetzt die Temperaturwechselwirkung des Absorbers mit dem Gehäuse. Diese Temperaturwechselwirkung kann bei kleinen Temperaturdifferenzen als linear angesetzt werden. Die Proportionalitätskonstante ist $\frac{1}{R}$, wobei R als thermischer Widerstand bezeichnet wird.

Um den Einfluß der nie ganz zu vermeidenden Schwankungen von T_G zu eliminieren, wird nicht die Temperatur T_A gemessen, sondern die Temperaturdifferenz zwischen dem bestrahlten Absorber A und einem gleichen unbestrahlten Körper B, der sich ebenfalls im Kalorimetergehäuse befindet (differentielles Kalorimeter). Für Körper B gilt die Gleichung (2) mit $A_s = 0$

$$M_B \cdot c_B \cdot dT_B = -\frac{1}{R}(T_B - T_G)dt \quad . \qquad (3)$$

Unter der Voraussetzung, daß $M_B \cdot c_B = M_A \cdot c_A = C$ ist, folgt durch Subtraktion der Gleichung (3) von Gleichung (2)

$$(\frac{dT_A}{dt} - \frac{dT_B}{dt}) \cdot C + \frac{1}{R}(T_A - T_B) = A_s \quad . \qquad (4)$$

Danach ist bis auf die Korrektur für $\frac{1}{R}(T_A - T_B)$ der gesuchte Energiestrom $A_s = C \cdot (\frac{dT_A}{dt} - \frac{dT_B}{dt})$. Die Korrektur wird graphisch für $A_s = 0$ vor und nach der Bestrahlung aus dem Temperaturgang ermittelt (s. Abb. 6). Eine weitere Fehlerquelle liegt noch in der ungenauen Kenntnis des Wertes C sowie in der Tatsache, daß diese kleinen Temperaturdifferenzen meistens durch eine indirekte Meßmethode (z.B. Widerstandsänderung) gemessen werden, wobei der Fehler des Eichfaktors in das Ergebnis eingeht. Die Berechnung der Wärmekapazität setzt eine genaue Kenntnis der spezifischen Wärmen des Absorbermaterials und des verwendeten Thermometers voraus. Die Kenntnis des Eichfaktors gewinnt man z.B. bei dem Widerstandsthermometer aus der Messung des Temperaturkoeffizienten des Widerstandsmaterials. Einfacher ist jedoch der Weg, eine Heizwendel in den Absorber einzubringen, deren Widerstand genau bekannt ist [2]. Eine variable und meßbare Heizspannung erlaubt es dann, dem Absorber eine elektrische Energie A_E zuzuführen von der Größe, daß der sich ergebende Wert für $(\frac{dT_A}{dt} - \frac{dT_B}{dt})$ dem der Strahlungsmessung weitgehend entspricht. Nachdem auch bei der elektrischen Aufheizung die Korrektur für $\frac{1}{R} \cdot \Delta T$ durchgeführt worden ist, ergibt sich endgültig für A_s

$$A_s = A_E \frac{\left(\frac{dT_A}{dt} - \frac{dT_B}{dt}\right)_s^{Korr}}{\left(\frac{dT_A}{dt} - \frac{dT_B}{dt}\right)_E^{Korr}} \qquad (5)$$

2. Aufbau des Kalorimeters

Der prinzipielle Aufbau des Kalorimeters ist aus den Abbildungen 1a und 1b zu ersehen. Es handelt sich um ein differentielles Kalorimeter, bei dem die Temperaturdifferenz zwischen zwei gleichen Körpern A und B gemessen wird. Um Fehler durch etwaige Verschiedenheiten zwischen den Körpern A und B auszugleichen, ist das ganze Kalorimeter um die Achse Z drehbar. Es kann also wahlweise Körper A oder Körper B bestrahlt werden, und die oben genannten Fehler können durch Mittelwertbildung eliminiert werden. Es handelt sich weiterhin um ein isothermes Kalorimeter, bei dem das Kalorimetergehäuse G durch das sich in der Wanne W befindende Wasser auf konstanter Temperatur gehalten wird (Näheres s. Abschnitt 3.1). Als Strahlungsquelle

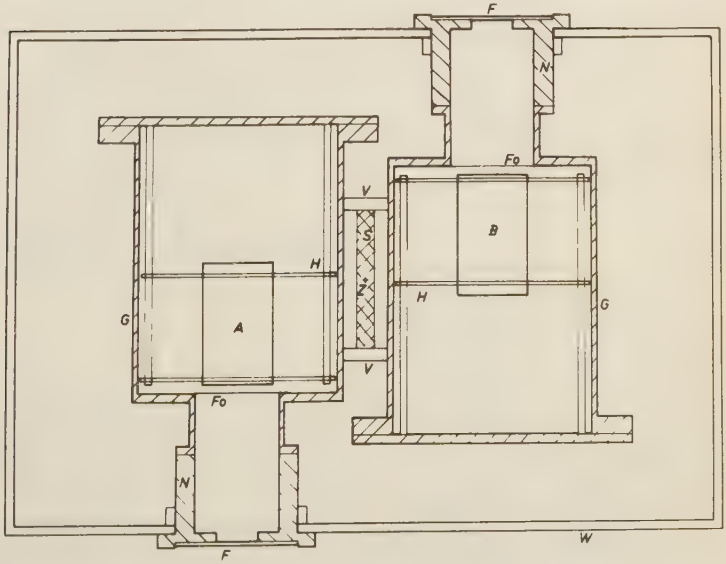


Abb. 1a Erläuterung siehe nächste Seite

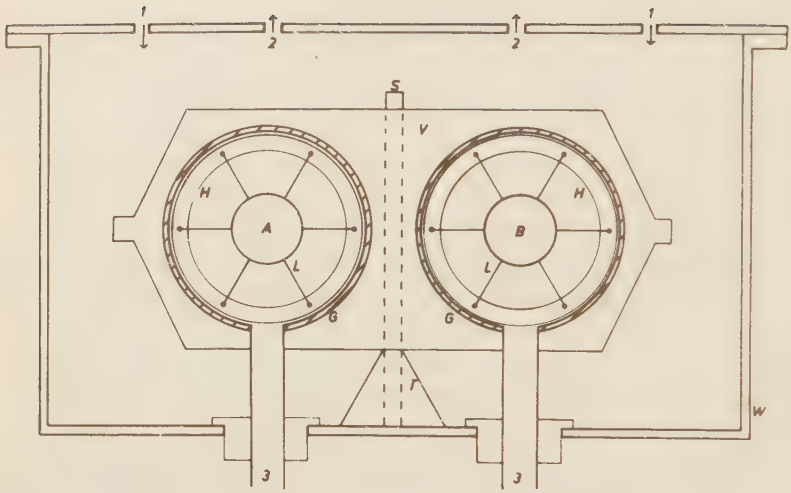


Abb. 1a u. 1b Skizze des Kalorimeters. W = Wanne aus Hart-PVC mit Wasser gefüllt, G = Kalorimetergehäuse, V = Verbindungsstück zwischen beiden Teilen des Kalorimeters, A,B = Absorber, H = Gestänge zur Aufhängung der Absorber, L = Aufhängefäden, F = Strahlungsfenster (2 mm Plexiglas), N = Kunststoffstutzen (Novotext) zur Wärmeisolierung von G gegen Außentemperatur, Fo = 0,05 mm starke Alu-Folie zur Abschirmung der Absorber gegen Wärmestrahlung vom Fenster F, Z = Drehachse des Kalorimeters, S = Bleiabschirmung (1 cm stark) für Streustrahlung zwischen A und B, T = Auflage für V aus Hart-PVC, 1 = Zulauf vom Thermostaten, 2 = Abfluß zum Thermostaten, 3 = Pumpstutzen (zur Diffusionspumpe)

diente ein Co-60-Präparat einer Aktivität von ca. 50 Curie, das sich in einem fahrbaren Drehtresor der Firma "Bleihof Berlin" befand (Näheres s. Anhang). Das Kalorimeter samt Vakuumanlage und Umwälzthermostat war ebenfalls auf einen Wagen montiert und konnte bei der Arbeit am Kalorimeter (z.B. Auswechseln der Absorber) vom Bleitresor weggefahren werden. Um eine reproduzierbare Einstellung von Kalorimeter

zu Strahlungsquelle zu garantieren, lief der Kalorimeterwagen auf Schienen. Der für die Bestrahlung richtige Ort des Wagens auf den Schienen ließ sich durch einen elektrischen Schleifkontakt auf ± 1 mm genau einstellen.

3. Temperaturmessung

3.1 Temperaturkonstanz des Wasserbades

Wie aus Abbildung 1 zu ersehen, befindet sich das Kalorimeter in einem Wasserbad von ca. 30 l, das durch einen Umwälzthermostaten der Firma Haake (Typ NBS, Inhalt 12 l) auf konstanter Temperatur gehalten wird. Die Umwälzleistung des Thermostaten beträgt ca. 20 l pro Minute, so daß in etwa 2 Minuten das Wasserbad einmal ausgetauscht ist. Um die vom Hersteller angegebene Temperaturkonstanz von 0,01 °C im Wasserbad zu erreichen, mußten zwei Maßnahmen ergriffen werden:

1. Stabilisierung der Raumtemperatur auf 0,1 °C durch einen mit einem Kontaktthermometer gesteuerten Heizlüfter.
2. Konstanthalten des Kühlwasserdruckes und damit der Kühlwasserdurchflußmenge durch den Thermostaten durch Anbringung eines Überlaufgefäßes. (Die im Wasserleitungsnetz auftretenden Druckschwankungen ließen den Arbeitspunkt des Thermostaten ohne diese Regelung um 0,03 °C wandern.) Dadurch war im Wasserbad die Temperaturkonstanz über mehrere Stunden besser als 0,01 °C (Messung mit einem Beckmann-Thermometer, Teilung 1/500 °C).

3.2 Temperaturkonstanz der Absorber

Die Bleiabsorber befinden sich nach Abbildung 1 in einem evakuierten Gehäuse G, wo sie an Fäden an der Halterung H aufgehängt sind. Eine Wärmewechselwirkung mit dem Gehäuse G kann in dreierlei Weise erfolgen:

1. Wärmestrahlung
2. Wärmeleitung durch die Aufhängefäden und die elektrischen Zuleitungen
3. Wärmeleitung durch die restliche Luft im Gehäuse.

Bei einer Arbeitstemperatur von ca. 20 °C wird die Energieübertragung zwischen einem Absorber und der Wandung unter

der Voraussetzung, daß zwischen ihnen eine Temperaturdifferenz von 0,01 °C herrscht, berechnet. Für den zylindrischen Absorber wird eine Länge von 45 mm und ein Durchmesser von 20 mm angenommen. Der Wärmeaustausch durch Strahlung wird durch das Stefan-Boltzmannsche Strahlungsgesetz

$$N_S = \sigma \cdot F \cdot e (T_A^4 - T_G^4) \qquad (6)$$

beschrieben. Dabei sind:

F = Oberfläche des Absorbers
σ = die Stefan-Boltzmann-Konstante
e = Gesamtemissionsvermögen
T_A, T_G = absolute Temperatur von Absorber und Gehäuse.

Für das Emissionsvermögen e kann 0,1 eingesetzt werden, da alle Körper mit einer 0,05 mm starken polierten Alufolie umklebt waren. Nach Einsetzen der Zahlenwerte folgt für die Energieabgabe durch Strahlung

$$N_S = 20\ \mu W\ .$$

Die Wärmeleitung durch die Aufhängefäden und die elektrischen Zuleitungen wird durch Formel (7) angegeben.

$$N_{D,F} = \lambda \cdot F \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \cdot n\ . \qquad (7)$$

Dabei sind λ = Wärmeleitvermögen, F = Querschnittsfläche des Drahtes bzw. des Fadens, $\Delta T = T_A - T_G$, Δx = Länge des Fadens bzw. des Drahtes und n = Zahl der Drähte. Nach Einsetzen der Zahlenwerte folgt:

$N_D = 5 \mu W$ (Wärmeleitung in den Drähten)

$N_F = 0{,}6\ \mu W$ (Wärmeleitung in den Fäden).

Es wurden ursprünglich Nylonfäden benutzt, die zwar eine noch geringere Wärmeleitfähigkeit haben, jedoch über mehrere Tage ein deutliches Nachlassen der Spannung zeigten, so daß die Justierung der Absorber im Strahlengang nicht mehr gewährleistet war. Es werden deshalb Zwirnsfäden benutzt, da, wie oben ersichtlich, auch bei diesen die Wärmeleitung genügend klein ist. Die Wärmeleitung durch die restliche

Luft im Kalorimetergehäuse ist vom Druck im Gehäuse abhängig [3].

$$N_L = F \cdot \gamma \cdot p \cdot (T_A - T_G) \quad \frac{C_V + \frac{R}{2}}{2\pi RMT} \qquad (8)$$

Hier bedeuten γ = Akkomodationskoeffizient
C_V = spez. Wärme bei konst. Volumen
M = Masse des Absorbers
R = Gaskonstante.

In Abbildung 2 ist die Wärmeleitung nach der Formel (8) in Abhängigkeit vom Druck p dargestellt. Außerdem sind die Wärmeleitung durch Drähte und Fäden und die Wärmestrahlung sowie die Summe dieser drei Anteile eingezeichnet. Es zeigt sich, daß unterhalb von 10^{-4} Torr die Wärmeleitung durch die Luft zu vernachlässigen ist. Es wurden deshalb alle Messungen bei einem Druck $p < 10^{-4}$ Torr durchgeführt. Bei der angenommenen Temperaturdifferenz von 0,01 °C beträgt

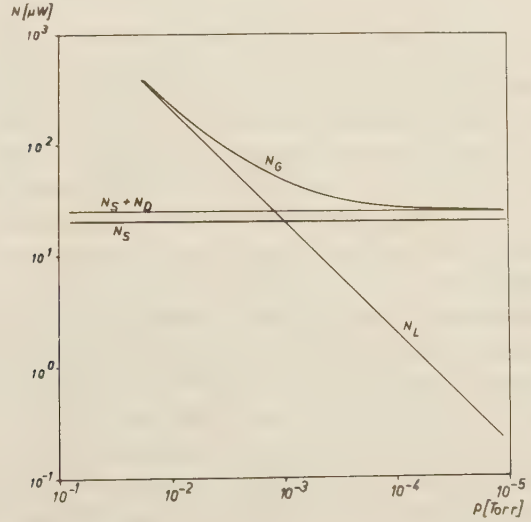


Abb. 2 Energieabgabe N eines Bleiabsorbers von 45 mm Länge und 20 mm Durchmesser bei 0,01 °C Temperaturdifferenz zwischen Absorber und Gehäuse in Abhängigkeit vom Druck p. N_S = Energieabgabe durch Strahlung, N_D = Energieabgabe durch Aufhängefäden und elektrische Zuleitung, N_L = Energieabgabe durch Wärmeleitung in der Luft, N_G = gesamte Energieabgabe

dann die gesamte Leistungsabgabe bzw. -aufnahme des Absorbers ca. 25 μW. Die Vakuumapparatur bestand aus einer zweistufigen Vorpumpe der Firma Leybold (Typ D 6) und einer Öldiffusionspumpe der Firma Balzers (Typ Diff 120). Das zur Messung benötigte Vakuum von $p < 10^{-4}$ Torr wurde, nachdem die Apparatur mehrere Stunden unter Lufteinwirkung stand, in ca. 50 Minuten erreicht. Um die Wärmewechselwirkung auch experimentell zu bestimmen, wurde eine Abkühlungskurve für einen Absorber mit den oben angegebenen Maßen aufgenommen. Es ergab sich eine Abkühlungskonstante $k = 0{,}009\ \text{min}^{-1}$. Daraus läßt sich die Energieabgabe bzw. -aufnahme des Absorbers bei einer vorgegebenen Temperaturdifferenz errechnen

$$\frac{dE}{dt} = k \cdot C\ (T_A - T_G). \qquad (9)$$

Das entspricht bei 0,01 °C Temperaturdifferenz zwischen dem Absorber und dem Gehäuse einer Energiewechselwirkung von 30 μW. Bei dieser relativ groben Abschätzung ist die Übereinstimmung zwischen Rechnung und experimenteller Bestimmung als befriedigend zu bezeichnen.

Weiterhin folgt daraus, daß diese Temperaturdifferenz von 0,01 °C einen Temperaturgang von $1 \cdot 10^{-4}$ °C pro Minute für den Absorber zur Folge hat. Das ist aber schon etwa die Größenordnung des beobachteten Temperaturganges bei Bestrahlungen (s. Abschnitt 3.4). Die Temperaturkonstanz des Gehäuses und damit des Wasserbades muß deshalb, wie schon oben berichtet, besser als 0,01 °C sein. Es mußte deshalb auch nach dem Einschalten des Kalorimeters bzw. nach irgendwelchen Änderungen an der Versuchsanordnung abgewartet werden, bis die restliche Temperaturdifferenz zwischen Absorber und Gehäuse kleiner als 0,01 °C war. Auf Grund der kleinen Abkühlungskonstanten war dies nach ca. 8 - 10 Stunden der Fall. Um nicht täglich von neuem diese lange Zeit warten zu müssen, wurde die ganze Apparatur in Dauerbetrieb Tag und Nacht eingeschaltet gelassen. Nach ≥4stündigem Betrieb entsprach der auf dem Kompensationsschreiber registrierte restliche Widerstandsgang einem Temperaturgang von etwa $1 \cdot 10^{-5}$ bis $5 \cdot 10^{-6}$ °C/min (s. Abb. 6).

3.3 Temperaturmeßbrücke

Als Temperaturnachweisfühler dienten NTC-Widerstände, auf die in Abschnitt 3.4 näher eingegangen wird. Die Widerstandsänderung wurde in einer Wheatstoneschen Brückenschaltung gemessen. Das Blockschaltbild der Anordnung zeigt

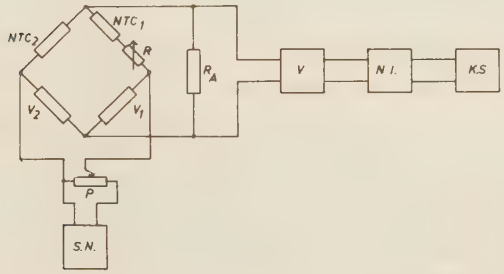


Abb. 3 Blockschaltbild der Meßbrücke

SN = Spannungsnormal, P = Potentiometer zur Einstellung der Meßspannung, V_1, V_2 = Vergleichswiderstände (150 kΩ), NTC_1, NTC_2 = temperaturabhängige Widerstände in den Absorbern A und B, R = variabler Widerstand zum Abgleichen der Brücke (einstellbar auf 0,1 Ω, Umfang 100 kΩ), R_A = Abschlußwiderstand der Brücke, V = Gleichspannungs-Nullverstärker, NI = Nullinstrument, KS = Kompensationsschreiber

Abbildung 3. Die Brückenspannung wurde von einem Nullverstärker der Firma Knick (Typ T) verstärkt und auf ein Nullinstrument (ebenfalls Firma Knick, Typ PA 24) gegeben. Nachdem die Brücke mit Hilfe des Widerstandes R abgeglichen war, wurde der Spannungsverlauf während eines Bestrahlungs- oder Heizvorganges mit einem Kompensationsschreiber (Philips, Typ PR 2210/A 21) aufgezeichnet. Die von der Gleichspannungsquelle (Wandel und Goltermann, Typ SN 2) gelieferte Brückenspannung hat eine Konstanz von $\pm\ 1 \cdot 10^{-4}$. Die Wahl der Widerstandswerte für die NTC-Widerstände und die Vergleichswiderstände V ist an folgende Bedingungen geknüpft.

Eine gegebene Temperaturänderung soll eine große Widerstandsänderung bewirken und diese zu einer maximalen Spannungs

änderung am Eingang des Verstärkers führen. Die erste Bedingung ist erfüllt, wenn der NTC-Widerstand einen großen Temperaturkoeffizienten hat. Eine große Eingangsspannung wird durch geeignete Wahl der Brückenwiderstände und der Meßspannung erreicht. Den Zusammenhang zwischen diesen Größen liefert die Brückengleichung [4].

$$U = \frac{U_M}{R_G R_A (R_{NTC_1}+R_{NTC_2}+R_{V_1}+R_{V_2}+R)+(R_{NTC_1}+R+R_{V_1})\cdot(R_{NTC_2}+R_{V_2})} \cdot \frac{R_{NTC_2}\cdot R_{V_1} - (R_{NTC_1}+R)\cdot R_{V_2}}{} \qquad (10)$$

Dabei sind U_M die Meßspannung und R_G der Gesamtwiderstand der Brücke. Unter der Voraussetzung, daß $R_{NTC_1}+R = R_{NTC_2}$ und $R_{V_1} = R_{V_2}$, folgt $U_{RA} = 0$. Für kleine Widerstandsänderungen ΔR eines der beiden NTC-Widerstände ist $\Delta U_{RA} \sim \Delta U_R$. Es muß jedoch zusätzlich beachtet werden, daß die elektrische Energie des Meßstromes ebenfalls eine Erwärmung bewirkt. Nun ist es zwar wiederum ein Vorteil des differentiellen Kalorimeters, daß sich bei völlig gleichen NTC-Widerständen dieser Betrag bei der Messung der Temperaturdifferenzen zwischen Körper A und B nicht bemerkbar macht; jedoch die schon erwähnten Unterschiede in den Widerstandswerten der verwendeten NTC-Widerstände haben zur Folge, daß die Erwärmung durch den Meßstrom in beiden Absorbern nicht gleich ist. Außerdem ist es auch ungünstig, wenn die durch den Meßstrom verursachte Temperaturerhöhung zu groß wird, weil dann die Voraussetzung von S. 3 (2) nicht mehr erfüllt ist. Beide Fehler werden vermieden, wenn man die Heizleistung des Meßstromes gegenüber den zu erwartenden Strahlungsleistungen klein hält.

Ein Optimum für diese Bedingungen wurde bei folgenden Daten gefunden:

Meßspannung U_M = 3 Volt
V_1, V_2 = 150 kΩ
NTC_1, NTC_2 = 150 Ω
R_A = 100 kΩ .

Mit diesen Daten hatte die Brücke eine Empfindlichkeit von 7 Skt/Ω auf dem Kompensationsschreiber, wie durch entsprechende Änderung des Abgleichwiderstandes R festgestellt wurde.

Dabei ließ sich noch ein Ohm auf ± 20 % genau messen. Das Rauschen (Ausschläge auf dem Kompensationsschreiber von Spitze zu Spitze) betrug bei kurzgeschlossenem Verstärkereingang 0,5 Skt, bei angeschlossener Meßbrücke, wobei jedoch die NTC-Widerstände durch Kohleschichtwiderstände ersetzt waren, 1 Skt, und bei angeschlossener Meßbrücke mit NTC-Widerständen 3 Skt. Daraus ergibt sich deutlich, daß die Nachweisgrenze für die Widerstandsänderungen wesentlich durch das Rauschen der NTC-Widerstände begrenzt ist. Diese Angaben beziehen sich auf die endgültig benutzten Zwerg-NTC-Widerstände.

3.4 Temperaturmeßwiderstände (NTC)

Die NTC-Widerstände sind aus Halbleitermaterialien hergestellt, deren Widerstand mit steigender Temperatur stark abnimmt. Die Temperaturabhängigkeit wird für nicht zu große Temperaturbereiche durch

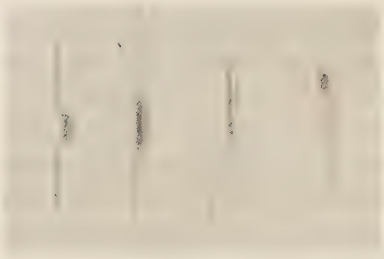
$$R = A \cdot e^{B/T} \qquad (11)$$

gut wiedergegeben [5]. Dabei wird T in ^{o}K angegeben. A und B sind Materialkonstanten. Aus Gleichung (11) erhält man durch Differentiation den Temperaturkoeffizienten TK_R eines NTC-Widerstandes

$$TK_R = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dT} = -\frac{B}{T^2} \cdot \qquad (12)$$

Für die handelsüblichen NTC-Materialien liegt B zwischen 2000 und 6000 ^{o}K. Das ergibt bei T = 300 ^{o}K (Zimmertemperatur) einen TK_R-Wert von etwa - 1,1 % bis - 6,7 %.

Es wurden zuerst stabförmige NTC-Widerstände der Firma Valvo vom Typ B 8320 007/150 k benutzt mit einem TK_R von ca. - 6 % (Abbildung 4a). Um die Durchmesser der Bohrungen in den Absorbern, die die NTC-Widerstände aufnehmen sollen, klein zu halten, werden die Zuleitungen auf andere Weise angelötet (Abbildung 4b) und danach zur elektrischen Isolierung die NTC-Widerstände lackiert. Um einen guten Wärmekontakt der NTC-Widerstände mit den Absorbern zu erreichen, wurden sie anschließend mit niederschmelzenden Legierungen



a b c

Abb. 4 Die verwendeten NTC-Widerstände
a stabförmiger NTC-Widerstand
b stabförmiger NTC-Widerstand mit neuangelöteten Zuleitungen und Lackierung
c Zwerg-NTC-Widerstand. Der NTC selbst ist die kleine Kugel an der Spitze.

(Doduco CR 31 und CR 32) in den Bohrungen der Absorber vergossen.

Es stellten sich nun zwei Schwierigkeiten ein:
1. Das Widerstandsrauschen dieser NTC-Typen war vor der Lötung schon sehr hoch (ca. 5 Skt auf dem Schreiber) und stieg danach auf etwa 10 - 12 Skt an, was auf eine schlechte Kontaktgabe zwischen dem Halbleitermaterial und dem Lötmittel zurückzuführen ist. Alle Versuche, diese Kontaktgaben zu verbessern, schlugen fehl.

2. Die Lackschichten mußten einerseits sehr dünn sein, damit sie keine Wärmeisolierung bedeuten, andererseits mußten sie jedoch eine gewisse mechanische Festigkeit besitzen, damit die Isolierung beim Vergießen nicht zerstört wurde. Wegen der Temperaturempfindlichkeit der NTC-Widerstände konnten nur Lacke benutzt werden, die unterhalb von 80 - 90 °C aushärten. Das hatte zur Folge, daß ca. 70 % der gelöteten und lackierten NTC-Widerstände doch Kurzschluß mit dem Absorber hatten. Da andererseits unter 20 NTC-Widerständen im Durchschnitt nur 2 - 3 Exemplare waren, deren TK_R-Koeffizienten für die Messung genügend

genau übereinstimmten, wäre die Zahl der zu untersuchenden NTC-Widerstände sehr groß geworden.

Aus diesen Gründen wurde auf die Benutzung der stabförmigen NTC-Widerstände verzichtet, und es wurden zwergförmige NTC-Widerstände in Glaseinschmelzung (Abbildung 4c) benutzt. Diese zeigten die oben genannten Nachteile nicht. Die Stärke der Glasumhüllung beträgt laut Auskunft der Firma Valvo nur ca. 0,1 - 0,2 mm, und damit ist die gegebene Wärmeisolierung nicht so schwerwiegend. Unangenehm war jedoch, daß bei den Zwerg-NTC-Widerständen der TK_R-Koeffizient maximal nur - 4,8 % beträgt. Dies bedeutet einen Verlust an Empfindlichkeit gegenüber den stabförmigen Typen um etwa 22 %. Da jedoch das Widerstandsrauschen um den Faktor 2 geringer ist, war die Genauigkeit gegenüber den Messungen mit den stabförmigen Typen fast verdoppelt.

Die glaseingeschmolzenen Zwerg-NTC-Widerstände wurden nicht in den Bleiabsorbern vergossen, sondern die entsprechenden Bohrungen der Absorber wurden so groß gewählt, daß die Zwerg-NTC-Widerstände gerade fest hineinpaßten. Die Auswahl der zu verwendenden Zwerg-NTC-Widerstände geschah dadurch, daß bei einer größeren Serie der TK_R-Koeffizient bestimmt wurde. Zu diesem Zweck befand sich im Wasserbad des Thermostaten ein mit Wasser gefülltes Gefäß, in das die NTC-Widerstände eintauchten. Mit einem Beckmann-Thermometer wurde in diesem Gefäß die Temperatur auf 0,01 °C genau gemessen. Die Thermostattemperatur wurde in Schritten von ca. 1 °C von 20 - 25 °C variiert und für jede Temperatur der Widerstand in einer der in Abbildung 3 gezeigten Brükkenschaltung ähnlichen Anordnung ausgemessen. An zwei in dem differentiellen Kalorimeter zu verwendende NTC-Widerstände sind folgende Anforderungen zu stellen:

1. Übereinstimmung im Widerstandswert bei der Arbeitstemperatur auf 5 %. Dann beträgt mit den auf S.12 angegebenen Werten die Heizleistung des Meßstromes ca. 15 µW. Bei der geforderten Übereinstimmung von 5 % bedeutet das einen Unterschied in den Heizleistungen von weniger als 1 µW. Das ist etwa 1 % der kleinsten auftretenden Strahlungsleistungen und kann daher vernachlässigt werden.

2. Übereinstimmung im Temperaturkoeffizienten auf 2 %. Dann ist bei einer Temperaturänderung von 0,01 °C im Thermostatbad die vorgetäuschte Temperaturdifferenz zwischen den beiden Absorbern kleiner als $2 \cdot 10^{-4}$ °C.

Abbildung 5 zeigt die Temperaturabhängigkeit der vier bei allen Messungen verwendeten Widerstände. Es ergeben sich für 20 °C dabei folgende Temperaturkoeffizienten:

$$\begin{aligned} \text{I:} \quad & TK_R = -4{,}60\ \% \\ \text{II:} \quad & TK_R = -4{,}52\ \% \\ \text{III:} \quad & TK_R = -4{,}87\ \% \\ \text{IV:} \quad & TK_R = -4{,}80\ \%. \end{aligned}$$

Es wurden jeweils Nr. I und II und Nr. III und IV paarweise benutzt. Ein Einfluß der Kobalt-60-Strahlung auf den Widerstandswert konnte nicht festgestellt werden. Für Nr. II wurde der Meßpunkt bei 20 °C vor und nach einer Bestrahlung mit 500 Röntgen gemessen, ohne daß innerhalb der Fehlergrenzen eine Abweichung festzustellen war.

Die Gesamtempfindlichkeit der Brückenschaltung mit den NTC-Widerständen betrug 7 Skt/Ω ± 20 %. Das entspricht einer Nachweisgenauigkeit der Temperaturänderung von $1{,}4 \cdot 10^{-4}$ °C ± 20 %. Wie schon erwähnt, ist die Empfindlichkeit im wesentlichen durch das niederfrequente Rauschen

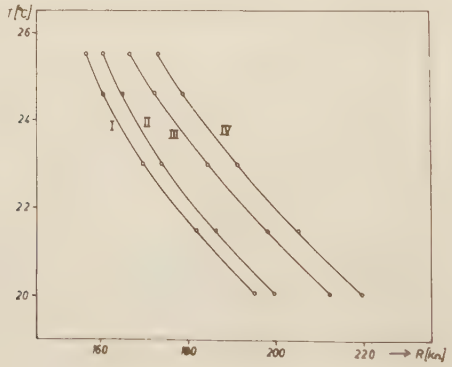


Abb. 5 Temperaturabhängigkeit der verwendeten Zwerg-NTC-Widerstände

der NTC-Materialien begrenzt. Abbildung 6 zeigt einen typischen Meßverlauf, wobei die Bestrahlung von "ein" bis "aus" durchgeführt wurde (ca. 4 Minuten Bestrahlungszeit). Die Erwärmung beträgt $1{,}8 \cdot 10^{-3}$ °C, und das restliche Rauschen von $\pm$ 1 Skt entspricht etwa $\pm\ 2{,}5 \cdot 10^{-5}$ °C. Der restliche Temperaturgang beträgt vor der Bestrahlung $0{,}25 \cdot 10^{-5}$ und nach der Erwärmung $4 \cdot 10^{-5}$ °C/min. Der Einfluß des Ortes der Temperaturmessung auf die Größe der gemessenen Temperaturdifferenz wird im Abschnitt 4.2 untersucht.

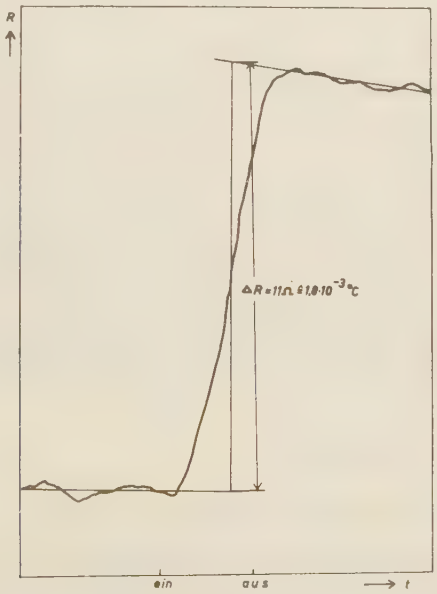


Abb. 6 Widerstandsverlauf bei einer von "ein" bis "aus" (ca. 4 Min.) dauernden Bestrahlung

3.5 Elektrische Eichung

Obgleich aus der Kenntnis des Temperaturkoeffizienten der NTC-Widerstände und der Wärmekapazität der Absorber sich die zugeführte Strahlungsenergie aus der Widerstandsänderung berechnen ließe, geht man im allgemeinen aus den im Kapitel 1 angegebenen Gründen nicht diesen Weg. Es wird

zur Bestimmung der zugeführten Strahlungsenergie eine Eichung durch elektrische Energie, die die gleiche Erwärmung erzeugt, durchgeführt. Zu diesem Zweck befindet sich eine Heizwendel aus lackiertem Widerstandsdraht, der auf einen ca. 5 mm starken Bleistab aufgewickelt wird, in einer Bohrung in den Absorbern. Der Widerstandswert der Heizwendeln wurde mit einer Meßbrücke auf 1 ‰ bestimmt. Die Heizspannung wurde mit einem Lichtzeigerinstrument der Güteklasse 0,2 gemessen. Daraus ergibt sich, daß die zugeführte elektrische Energie auf ca. 3 ‰ bekannt war. Dieser Fehler kann gegenüber den durch das Widerstandsrauschen verursachten Schwankungen vernachlässigt werden.

Die Steigung der Heizwendeln wird nicht konstant gewählt [2], sondern so, daß die pro cm im Absorber verbrauchte elektrische Energie der dort auf Grund des Schwächungsgesetzes absorbierten Strahlungsenergie entspricht. Da bei Blei die Halbwertschicht für Kobalt-60-Strahlung etwa 1 cm beträgt, lautet das Verhältnis der Windungszahlen der Heizwendeln pro cm in Strahlrichtung 1 : 0,5 : 0,25 : 0,50 : 0,125 ... Eine experimentelle Nachprüfung der Bedeutung dieser Art der Heizwendelsteigung wird in Kapitel 4.2 gegeben.

4. Experimentelle Ergebnisse

4.1 Allgemeines zur Durchführung der Messungen

Die Messungen geschahen in der Weise, daß die Spannungsänderungen ΔU_{RA}, die nach (10) den Widerstandsänderungen ΔR proportional sind, auf dem Kompensationsschreiber aufgezeichnet (s. Abb. 6) und graphisch korrigiert wurden.

Für kleine Temperaturänderungen ist nach (12) $\Delta R \sim \Delta T$. Außerdem wird in der Brückenschaltung (Abb. 3) direkt die Differenz $\Delta R_A - \Delta R_B = \Delta R$ gemessen, so daß sich (5) unter diesen Voraussetzungen schreiben läßt als

$$A_S = A_E \cdot \frac{\left(\frac{\Delta R}{\Delta t}\right)^{\text{Korr}}_{S}}{\left(\frac{\Delta R}{\Delta t}\right)^{\text{Korr}}_{E}} \quad . \tag{13}$$

Bei allen Ergebnissen handelt es sich um Mittelwertsbildungen von 10 - 15 Messungen. Die angegebenen Fehler sind die relativen Fehler des Mittelwertes.

Alle im folgenden beschriebenen Meßreihen wurden unter folgenden Bedingungen aufgenommen:

1. Die Heizleistung der elektrischen Eichung wurde der jeweils absorbierten Strahlungsleistung weitgehend angeglichen, da nur dann die Korrekturen für die Wärmeverluste vergleichbar sind (s. S. 4).

2. Bevor eine Erwärmung durch Strahlung oder elektrische Heizung durchgeführt wurde, mußte der restliche Temperaturgang auf mindestens $1 \cdot 10^{-4}$ °C/min abgeklungen sein, da sonst die Temperaturausgleichsvorgänge die Messung zu stark überdeckten.

Abbildung 7 zeigt eine maßstabsgetreue Skizze der geometrischen Anordnung von Strahlungsquelle und Kalorimeter. Die Blenden B_1 und B_2 konnten je nach Meßproblem ausgewechselt werden. Die Meßreihen wurden bei einem Blendendurchmesser von 12 mm oder 20 mm durchgeführt. Die Blendenkorrekturen wurden an Hand von Abbildung 7 in Anlehnung an die von GEISLER und BRUNNER angegebenen Formeln berechnet [7].

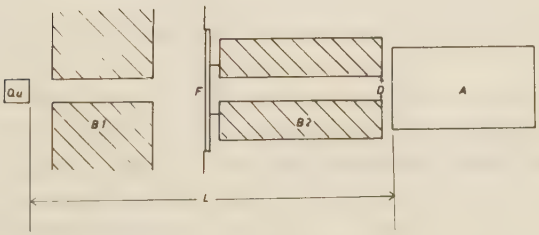


Abb. 7 Strahlengang der Anordnung Quelle (Qu) - Absorber (A). Die Länge L betrug bei allen Messungen 180 ± 3 mm. Der Durchmeser D der Blenden B_1 und B_2 konnte je nach Meßproblem 12 oder 20 mm groß gewählt werden. Das Eintrittsfenster F bestand aus 2 mm starkem Plexiglas.

4.2 Abhängigkeit der Meßergebnisse vom Ort der Temperaturmessung und vom Durchmesser der Heizwendel

Als Voruntersuchung wurde die Frage geprüft, ob der Temperaturausgleich innerhalb der Bleiabsorber genügend schnell erfolgt, so daß man von einer einheitlichen Temperatur des ganzen Absorbers sprechen kann. Eine theoretische Behandlung des Problems ist mathematisch sehr aufwendig, da der Temperaturgradient im Körper räumlich und zeitlich nicht konstant ist. Um die Frage experimentell zu klären, wurden zwei Bleiabsorber der in Abbildung 8 dargestellten Art benutzt. Sie enthielten drei konzentrische Heizwendeln (I, II und III) mit verschiedenem Radius und vier Bohrungen (1, 2, 3 und 4) zur Aufnahme der NTC-Widerstände in verschiedenem Abstand vom Mittelpunkt.

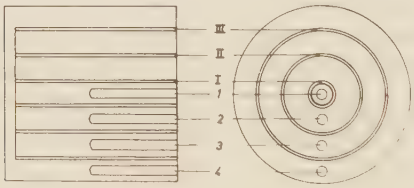


Abb. 8 Bleiabsorber von 40 mm Durchmesser und 40 mm Länge mit 3 Heizwendeln I, II und III, die in den entsprechenden Ringen vergossen sind, und 4 Bohrungen 1, 2, 3 und 4 zur Aufnahme der NTC-Widerstände

Es wurden mit der in Abbildung 7 gezeigten Anordnung bei einem Blendendurchmesser von 12 mm die Erwärmung für alle vier Temperaturmeßstellen und die zu den gleichen Erwärmungen führenden elektrischen Leistungen mit je allen drei Heizwendeln gemessen. Die Ergebnisse, die gemäß Formel (5) berechnet sind, zeigt Tabelle 1 (Angaben in µW). Der Fehler beträgt bei den einzelnen Meßpunkten 3 - 4 %.

Innerhalb der Fehlergrenzen ist keine unterschiedliche Erwärmung für die einzelnen Meßpunkte festzustellen. Daraus folgt, daß in der Mitte des Körpers in radialer Richtung

praktisch Temperaturausgleich herrscht.

		Meßstelle			
		1	2	3	4
Heizwendel	I	207	202	200	207
	II	202	201	202	198
	III	204	202	204	197,5

Tabelle 1 Die nach Formel (5) errechneten absorbierten Energien für die in Abbildung 8 gezeigten Absorber

Als nächstes wurde die Frage untersucht, ob die Temperatur im Absorber auch in axialer Richtung konstant ist. Zu diesem Zweck wurden drei zylinderförmige Absorber (D = 40 mm, L = 40 mm) benutzt, bei denen die rückseitigen Bohrungen zur Aufnahme des NTC-Widerstandes 10, 20 und 30 mm tief waren. Die gemessenen Widerstands- bzw. Temperaturänderungen pro Zeiteinheit verhalten sich wie 7 : 10 : 15. Daß in dieser Richtung eine deutliche Abhängigkeit der Erwärmung vom Meßort auftritt, erklärt sich daraus, daß die Halbwertsschicht für Kobalt-60-Strahlung bei Blei nur ca. 1 cm beträgt und somit die absorbierte Energie in Strahlungsrichtung sehr stark abnimmt. Die zu den jeweilig gleichen Erwärmungen benötigten elektrischen Leistungen verhielten sich dagegen wie 370 : 352 : 358. Daß diese Werte fast konstant sind, ist auf den Einfluß der variablen Steigung der Heizwendel in Richtung der Absorberachse zurückzuführen (s. dazu auch S. 18). Man kann also auch hier sagen, daß innerhalb der Meßgenauigkeit der Meßort in Strahlrichtung auf das Ergebnis keinen Einfluß ausübt; jedoch wird man, um einen großen Meßeffekt zu erhalten, die Temperaturmessung jeweils im ersten Drittel des Absorbers vornehmen. Dies ist bei allen weiteren Meßreihen der Fall.

4.3 Energierückstreuung

Um die Energierückstreuung an der Auftrefffläche der Strahlung zu untersuchen, wurden Messungen mit Bleiabsorbern durchgeführt, deren Vorderfläche eine Faraday-Becher-Form aufwies (Abbildung 9). Unter gleichbleibender Geometrie wurde bei einem Strahldurchmesser von 12 mm die Energieab-

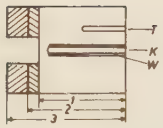


Abb. 9 Die Bleiabsorber 1 (glatte Vorderfläche), 2 (5 mm tiefe Bohrung) und 3 (15 mm tiefe Bohrung) zur Messung des Einflusses der Rückstreuung. Die Bohrung T nimmt den NTC-Widerstand auf, während die Heizwicklung W um den Bleikern K gewickelt und dann mit Zinn vergossen ist.

sorption bei glatter Vorderfläche (1), bei 5 mm tiefer (2) und bei 15 mm tiefer Bohrung (3) gemessen. Die Ergebnisse lauteten für (1) = 356 µW, für (2) = 356 µW, für (3) = 361 µW.

Es läßt sich aus diesem Ergebnis noch nicht eindeutig sagen, daß die Rückstreuung maximal nur 1 % betrage, da der Beitrag der nach der Rückstreuung nicht mehr eingefangenen Photonen nicht erfaßt wurde. Um dies mit zu erfassen, müßten weitere Messungen mit geringeren Querschnitten der Strahlungen und der Bohrungen in den Absorbern wiederholt werden. Da jedoch diese Korrektur, wie diese Ergebnisse schon zeigen, nicht sehr groß ist, und da andererseits bei geringeren Strahldurchmessern die Erwärmungen schnell so klein werden, daß die Meßfehler alle anderen Fehler überdecken, wurde diese Frage nicht weiter untersucht.

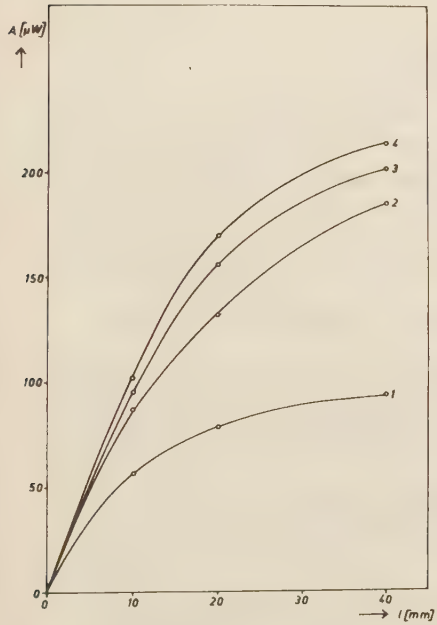
4.4 Abhängigkeit der Erwärmung von Länge und Durchmesser der Absorber

Der absorbierte Energiestrom ist von der Länge der Absorber abhängig, und zur vollständigen Absorption muß man eine derartige Länge wählen, daß der restliche Energiestrom A_V der einfallenden Strahlung kleiner als der Meßfehler ist. A_V folgt dabei aus dem Schwächungsgesetz

$$A_V = A_o \, e^{-\mu L} \, . \qquad (14)$$

Nicht ganz so leicht ist das Problem jedoch zu übersehen, wenn man den Energieanteil mitbetrachtet, der nach der Wechselwirkung der einfallenden Strahlung mit dem Absorber

diesen durch seine Seitenflächen oder auch in Vorwärtsrichtung verläßt. Um diese Energieverluste experimentell zu untersuchen, wurde bei einem Strahldurchmesser von 12 mm eine Serie von Meßkörpern bestrahlt, die verschiedene Durchmesser (12, 20, 30 und 40 mm) und verschiedene Längen (10, 20 und 40 mm) hatten. Abbildung 10a zeigt die Meßergebnisse ohne Korrekturen und Abbildung 10b nach Durchführung der Blendenkorrekturen. Zur Diskussion dieser Ergebnisse wird die Kurve mit D = 12 mm nicht weiter betrachtet. Hier war der Strahldurchmesser gleich dem Absorberdurch-



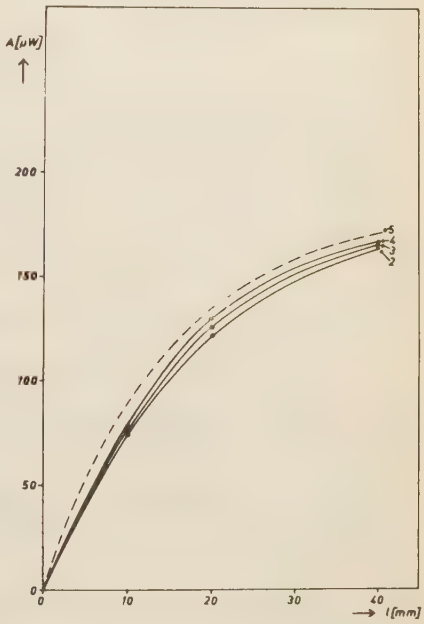


Abb. 10a Abb. 10b

Abb. 10a Der von Bleiabsorbern absorbierte Energiestrom A als Funktion der Absorberlänge l bei verschiedenen Durchmessern als Parameter.
1: Durchmesser = 12 mm
2: Durchmesser = 20 mm
3: Durchmesser = 30 mm
4: Durchmesser = 40 mm

Abb. 10b Meßwerte von Abb. 10a nach Durchführung der Blendenkorrekturen. Die gestrichelte Kurve (5) stellt den Verlauf bei einem idealen Absorber dar.

messer und wie Abbildung 7 zeigt, können durch die Divergenz der Strahlung große Energiebeträge am Absorber vorbeigehen. Das erklärt das auffallende Abweichen der Kurve D = 12 mm von den übrigen. Die gestrichelte Kurve in Abbildung 10b stellt den theoretischen Verlauf des Energiestromes dar, wenn jedes Photon, das in dem Absorber einen Wechselwirkungsprozeß erleidet, auch mit all seinen Sekundäranteilen voll absorbiert wird. Diese Kurve wurde aus dem Schwächungsgesetz (15) berechnet unter der Verwendung des auf S. 28 gefundenen und für den hier vorliegenden Raumwinkel umgerechneten Wertes für A_o und des von GRODSTEIN [10] angegebenen Wertes für μ

$$A = A_o \, (1 - e^{-\mu l}) \; . \qquad (15)$$

Wie man durch einen Vergleich der gemessenen Werte mit den theoretischen Werten sieht, werden die prozentualen Verluste durch Energiestreuung mit wachsender Länge der Absorber immer geringer, was auf eine überwiegende Vorwärtsstreuung zurückzuführen ist. Die Verluste betragen gegenüber dem oben angegebenen idealen Absorber weniger als 5 %, wenn der Absorberdurchmesser etwa 2 cm größer ist als der Strahldurchmesser.

Um dieses Ergebnis auch theoretisch zu untersuchen, wurde der Versuch unternommen, diese Streuverluste zu berechnen. Zu diesem Zweck wurden folgende Annahmen gemacht.

1. Die durch Photoeffekt und evtl. auch Paarbildung aus dem Primärstrahl verschwundene Energie bleibe völlig im Absorber.

2. Die Energie der Compton-Elektronen bleibe ebenfalls völlig im Absorber.

3. Es mögen keine Energieverluste durch Sekundäreffekte, wie z.B. doppelten Compton-Effekt oder Bremsstrahlung von Compton- und Photoelektronen, auftreten.

Das bedeutet, daß nur Verluste durch Compton-Photonen, die in der Lage sind, den Absorber zu verlassen, angenommen werden.

Es wird nun folgender Ansatz gemacht: Am Punkte x werden

auf der Absorberachse

$$dN_x = N_x \sigma dx = N_o e^{-\mu x} \sigma dx \qquad (16)$$

Compton-Photonen gebildet (s. Abb. 11).

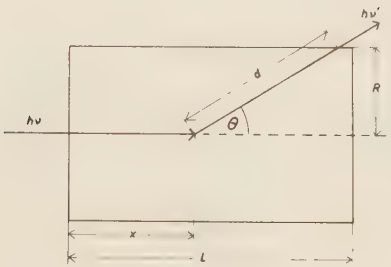


Abb. 11 Skizze zur Berechnung der Energieverluste durch Streustrahlung

Davon fliegen in Richtung θ

$$dN_{x,\theta} = N_o \, e^{-\mu x} \sigma \, dx \cdot W(\theta) \, d\theta \qquad (17)$$

W(θ) = Streuwahrscheinlichkeit für Richtung θ mit $\int_0^\pi W(\theta)d\theta = 1$. Sie durchlaufen den Weg d(x,θ), und es verlassen dann den Absorber

$$dN'_{x,\theta} = N_o \, e^{-\mu x} \cdot \sigma \cdot dx \cdot W(\theta) \cdot d\theta \cdot e^{-\mu(\theta) d(x,\theta)} \qquad (18)$$

Photonen, die die Energie

$$dE_{x,\theta} = dN'_{x,\theta} \cdot E(\theta) \qquad (19)$$

mitführen (E(θ) = hν' = Energie des gestreuten Photons). Nach Integration über x von 0 bis L und über θ von 0 bis π folgt für den Verlust

$$V = \int_0^L \int_0^\pi N_o e^{-\mu x} \cdot \sigma \cdot W(\theta) \cdot E(\theta) \cdot e^{-\mu(\theta) d(x,\theta)} \, dx \cdot d\theta \qquad (20)$$

Dieses Doppelintegral ist auf der elektronischen Rechen-

maschine Zuse Z 23 ausgerechnet worden, wobei Θ in 20 und x in 10 Intervallen berechnet wurden.

Die so errechneten Verluste liegen je nach Länge und Durchmesser des Absorbers zwischen 1 und 3 %. Tabelle 2 zeigt die Meßwerte noch einmal mit den Blendenkorrekturen und den

D [mm]	L [mm]	Meßwert A [µW]	Blenden-korrektur in % von A	Streu-strahlungs-korrektur in % von A_o	Korrigierte Werte [µW]
20	10	87	- 15,4	+ 2,6	80
20	20	141	- 13,3	+ 2,2	127
20	40	185	- 11,2	+ 1,6	167
30	10	95	- 20,4	+ 2,4	81
30	20	156	- 19,4	+ 2,1	130
30	40	202	- 18,5	+ 1,2	167
40	10	102	- 24,0	+ 2,4	83
40	20	170	- 23,0	+ 2,1	134
40	40	214	- 22,0	+ 1,0	169

Tabelle 2 Die in Abhängigkeit von R und L in Bleiabsorbern absorbierte Energie und die Korrektur für Energieverluste durch gestreute Photonen

berechneten Verlusten, und Abbildung 12 zeigt die Werte der letzten Spalte in graphischer Darstellung. Gegenüber der Abbildung 10b ist ein deutliches Zusammenrücken der Kurven festzustellen.

Der mittlere Fehler des einzelnen Meßpunktes beträgt hier $\pm$ 5 %. Innerhalb dieser Fehlergrenzen fallen die gemessenen Kurven mit der berechneten Kurve zusammen. Die restlichen Abweichungen sind auf die auf S. 24 angegebenen Vernachlässigungen, insbesondere wahrscheinlich auf Punkt 3 zurückzuführen.

Abb. 12 Werte aus Abb. 10b nach Durchführung der Korrektur für Streuverluste

4.5 Messung des einfallenden Energiestroms und Bestimmung der Absorptionskoeffizienten bei Blei und Quecksilber

Nachdem in den bisher beschriebenen Versuchen alle auftretenden Fehlerquellen für die gemessenen Erwärmungen untersucht worden sind, soll jetzt über die Bestimmung des Energiestroms der Photonenstrahlen berichtet werden. Die dabei verwendete Methode der verschieden langen Absorber erlaubt es auch, den Absorptionskoeffizienten des Absorbermaterials zu bestimmen. Um die verschiedenen Messungen vergleichen zu können, muß die Tatsache, daß die Aktivität der Strahlenquelle im Laufe der Zeit abnimmt, berücksichtigt werden. Es werden deshalb alle Ergebnisse auf ein einheitliches Datum (1. 4. 64) bezogen. Die Versuchsanord-

nung ist wieder die gleiche wie die in Abb. 7 dargestellte. Der Strahldurchmesser betrug 20 mm.

a) Messungen mit Blei

Es wurde eine Meßreihe mit Bleiabsorbern von 40 mm Durchmesser und Längen von 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60 und 70 mm durchgeführt. Den absorbierten Energiestrom, aufgetragen über der Länge des Absorbers, zeigt Abb. 13. Als extrapolierter Wert wird A_o = 570 µW ± 3 % angenommen. Nach Anbringung der Blendenkorrekturen entspricht das einer Energiestromdichte von 47 mW/Sterad ± 5 % bzw. 147µW/cm^2 ± 5 % am Meßort. Das entspräche einer Aktivität der Strahlungsquelle von 41,2 Curie. Um das kalorimetrische Ver-

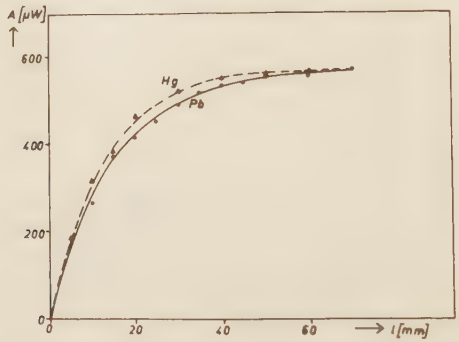


Abb. 13 Absorbierte Energie A von Blei- und Quecksilberabsorbern in Abhängigkeit von der Länge l

fahren zu überprüfen, wurde die Strahlung mit einer bei der PTB Braunschweig mit Kobalt-60-Strahlung geeichten Ionisationskammer (Victoreen, Modell Radocon 575 A) gemessen und aus der Dosisleistung die Aktivität mit (43,2 ± 2,2) Curie bestimmt. Die Werte der beiden Meßmethoden stimmen innerhalb der Fehlergrenzen überein. Weiterhin wurde die Differenz der Meßergebnisse zum extrapolierten Wert A' = A_o - A über der Länge der Absorber in

halblogarithmischer Darstellung aufgetragen (Abbildung 14). Es ergibt sich eine Gerade, deren Steigung der Absorptionskoeffizient für Blei $\mu = 0{,}648\ cm^{-1} \pm 2\ \%$ ist. Daraus läßt

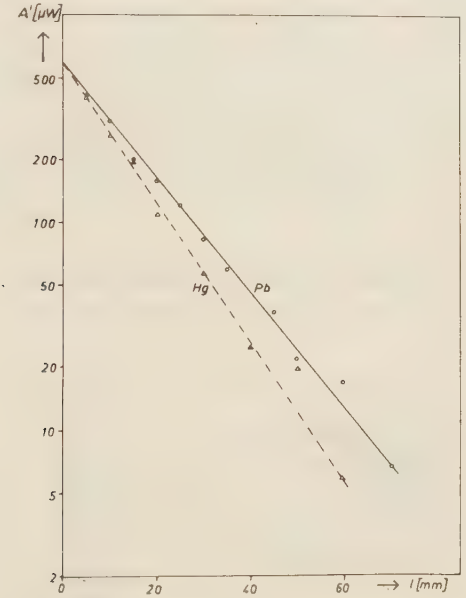


Abb. 14 Differenz von extrapoliertem Wert A und absorbierter Energie A (beide aus Abb. 13 entnommen) in logarithmischem Maßstab über der Länge der Blei- bzw. Quecksilberabsorber aufgetragen

sich der Massenabsorptionskoeffizient $\frac{\mu}{\rho} = 0{,}0574\ cm^2 \cdot g^{-1} \pm 2\ \%$ errechnen. Die Streustrahlungsverluste wurden für die Bleikörper nach dem in Kapitel 4.4 angegebenen Verfahren bestimmt. Als korrigierter Wert ergibt sich $\frac{\mu}{\rho} = 0{,}0584\ cm^2 \cdot g^{-1} \pm 2\ \%$. Dieser Wert weicht um 4 ‰ von dem von GRODSTEIN berechneten Wert ab (s. Abb. 16)

b) Messungen mit Quecksilber

Als zweites Absorptionsmaterial wurde Quecksilber gewählt, und zwar aus folgenden Gründen:

1. Quecksilber hat eine geringere spezifische Wärme und ein größeres Temperaturleitvermögen als Blei. Es ist

deshalb eine größere Erwärmung bei gleicher Energieabsorption zu erwarten.

2. Das Absorptionsvermögen von Quecksilber ist bisher noch nicht gemessen worden.

Die Meßanordnung war wieder die gleiche wie bei den Messungen mit den Bleiabsorbern. Das Quecksilber wurde in dünnwandigen Töpfen aus Hart-PVC (Abbildung 15), die einen inneren Durchmesser von 40 mm hatten, in den Strahlengang gebracht. In den Töpfen befand sich ein beweglicher Stempel, durch den die Dicke der Quecksilberschicht in Richtung der Strahlung variiert werden konnte. Es wurden Quecksilberschichten von 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50 und 65 mm verwendet. Die Heizwendeln befanden sich auf einem mit Löchern versehenen Papierröllchen, das am Stempel angeklebt war.

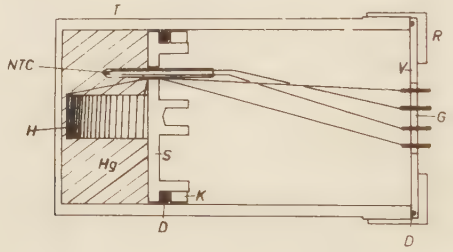


Abb. 15 Töpfe aus Hart-PVC mit 1,5 mm starker Wandung und 0,5 mm starkem Boden zur Aufnahme von Quecksilber. Hg = Quecksilber, S = beweglicher Stempel, H = Heizwendel, D = Dichtungsringe, K = Klemmring, V = Verschluß des Topfes, G = vakuumdichte Glasdurchführung, R = Überwurfring

Abb. 13 und 14 zeigen auch die Meßergebnisse für Quecksilber. Es ergibt sich innerhalb der Fehlergrenzen der gleiche Energiestrom A wie bei der Meßreihe mit den Bleikörpern. Für den linearen Absorptionskoeffizienten von Quecksilber folgt aus Abb. 14 $\mu = 0{,}777\ cm^{-1} \pm 2\ \%$ und daraus der Massenabsorptionskoeffizient $\frac{\mu}{\rho} = 0{,}0573\ cm^2 \cdot g^{-1} \pm 2\ \%$. Die Streustrahlungskorrektur von Kapitel 4.4 ist bei Quecksilber nicht durchzuführen, da die in Formel (20) benötigten Werte $\mu(\Theta)$ nicht bekannt sind. Wenn man annimmt, daß die Korrektur von der gleichen Größe wie bei

den Bleikörpern ist, ergibt sich als korrigierter Wert für $\frac{\mu}{\varrho}$ = 0,0583 $cm^2 \cdot g^{-1}$ ± 2 %.

Um den neu gewonnenen Absorptionskoeffizienten für Quecksilber mit den bisher bekannten Werten für andere Materialien zu vergleichen, wurden die bisher gemessenen Werte in Abbildung 16 in Abhängigkeit von Z aufgetragen. Die ausgezogene Kurve verbindet berechnete Werte von GRODSTEIN [10], die einzelnen eingetragenen Punkte bedeuten Meßwerte. Die Abweichung des kalorimetrisch gefundenen Wertes für den Massenabsorptionskoeffizienten von Quecksilber von dem berechneten Wert beträgt 1 %.

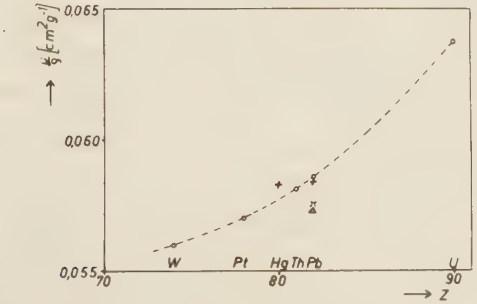


Abb. 16 Massenabsorptionskoeffizient für Kobalt-60-Strahlung in Abhängigkeit von Z. Die gestrichelte Kurve verbindet die von GRODSTEIN gerechneten Werte (○) [10]
x Meßergebnis von DAVISSON, EVANS [8]
△ Meßergebnis von WYARD [9]
+ eigene Meßergebnisse

4.6 Messungen mit Wasser

In einer neuen Meßreihe wurde versucht, in ähnlich dünnwandigen Töpfen aus Hart-PVC die Erwärmung von Wasserschichten verschiedener Dicke zu messen. Damit sollte die bisher nur mit indirekten Methoden [11] (Ionisationskammern hinter wachsenden Schichtdicken) bestimmte Tiefendosiskurve von Wasser, die für alle Radiologen von größtem Interesse ist, direkt gemessen werden. Es zeigte sich jedoch, daß dies nicht möglich war. Es konnten zwar geringe Erwärmungen im Wasser nachgewiesen werden, jedoch war, da sie so klein waren, der relative Meßfehler sehr groß, und außerdem konnte kein eindeu-

tiger Zusammenhang zwischen den Schichtdicken des Wassers und den gemessenen Erwärmungen festgestellt werden. Bei 5 und 30 mm starken Wasserschichten (NTC jeweils in der Mitte der Schicht) war eine fast gleiche Erwärmung festzustellen, die kleiner war als sich auf Grund der zugeführten Energie und der Wärmekapazität des Absorbers berechnen läßt. Daraus läßt sich schließen, daß der wesentlichste Meßfehler bei Wasser in dem schlechten Wärmeausgleich innerhalb des Absorbers begründet ist. Dies läßt sich auch aus den Temperaturleitzahlen für nichtstationäre Temperaturausgleichsvorgänge erkennen, die sich für Blei und Wasser wie 200 : 1 verhalten.

Es wurde daraufhin die Absorptionskurve nach der üblichen Methode, d.h. also Messung hinter wachsender Schichtdicke des Absorbermaterials durchgeführt. Der Unterschied gegenüber bisherigen Messungen mit Ionisationskammern oder anderen Dosismeßgeräten bestand jedoch beim Kalorimeter in dem Vorteil, daß die Messung der die Schicht durchsetzenden Strahlung völlig energieunabhängig erfolgt, was für die anderen Verfahren nur in gewissen Grenzen gilt. Es konnten hier nämlich auch alle in Vorwärtsrichtung gestreuten Photonen und besonders Elektronen mit gemessen werden.

Abb. 17 zeigt die Meßergebnisse, die mit Bleiabsorbern hinter Wasserschichten gewonnen wurden, deren Dicke auf der Abszisse abgetragen ist. Auf Grund des Schwächungsgesetzes für Photonen müßte die gestrichelte Gerade erwartet werden. Die in Vorwärtsrichtung gestreuten Elektronen bewirken jedoch, daß die Energieabsorption gegenüber der Primärstrahlschwächung um den Betrag der maximal auftretenden Elektronenreichweite versetzt ist. Bei der mittleren Gamma-Energie der Co-60-Strahlung beträgt die mittlere Elektronenreichweite in Wasser ca. 5 mm.
Die in Abb. 17 gezeigte Parallelverschiebung beträgt 5 mm $\pm$ 25 %. Es konnte somit die für dosimetrische Fragen wichtige räumliche Versetzung von Primärstrahlschwächung und Energieabsorption energieunabhängig gemessen werden.

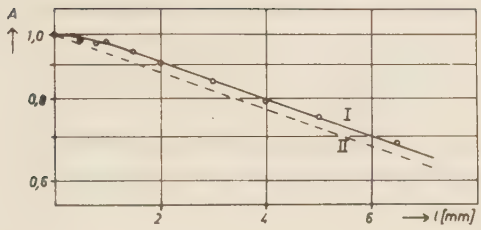


Abb. 17 Im Kalorimeter absorbierter Energiestrom A im logarithmischen Maßstab über der Dicke der im Strahlengang befindlichen Wasserschichten aufgetragen (der einfallende Energiestrom ist gleich 1 gesetzt worden). Die gestrichelte Kurve gibt den auf Grund des Schwächungsgesetzes errechneten Verlauf an. Der Wert für μ_{H_2O} wurde bei GRODSTEIN [10] entnommen.

Aus diesen Meßergebnissen sind für einen festen Abstand Quelle - Wasserschicht von 50 cm die Tiefendosiswerte errechnet worden. Nach der Normierung auf 100 für den Wert in 0,5 cm Tiefe lassen sie sich mit den von JOHNS [11] angegebenen Werten vergleichen. Tabelle 3 zeigt die Gegenüberstellung der hier gefundenen Werte mit denen von JOHNS. Die eigenen Meßwerte haben einen Fehler von $\pm$ 8 %, da in die Umrechnung die Entfernung, die nur auf $\pm$ 3 % bekannt ist, quadratisch eingeht.

Tiefe in cm	gemessene Werte	Werte von JOHNS
0,5	100	100
1	96,5	94,6
2	86,8	85,2
4	70,6	70,3
6	57,8	56,4

Tabelle 3: Vergleich der hinter Wasserschichten verschiedener Dicke gemessenen Tiefendosiswerte mit denen von JOHNS [11]. Die Werte sind für eine Schichtdicke von 0,5 cm normiert.

Die systematische Abweichung der gemessenen Tiefendosiswerte von den Werten von JOHNS ließe sich auf Grund des hier benutzten energieunabhängigen Meßverfahrens deuten, bei dem noch Anteile von Sekundärelektronen und -photonen mit zur Messung gelangten, die in den Wänden der von JOHNS verwendeten Ionisationskammern stecken blieben und daher nicht mit gemessen wurden. Auf Grund der großen Fehlergrenze ist diese Aussage jedoch sehr unsicher.

Zusammenfassung

Mit einem Absorptionskalorimeter wurden der Energiestrom einer Co-60 Gamma-Strahlungsquelle gemessen und Absorptionsmessungen an Blei, Quecksilber und Wasser durchgeführt. Durch Verwendung eines differentiellen Kalorimeters wurde der Einfluß der Schwankungen der Umgebungstemperatur eliminiert. Die Messung der absorbierten Energie geschah über die Messung einer elektrischen Energie, die im Absorber die gleiche Erwärmung hervorrief. Die gemessenen Erwärmungen ergaben innerhalb der Fehlergrenzen keine Abhängigkeit vom Meßort in radialer und eine starke Abhängigkeit in axialer Richtung. Die axiale Abhängigkeit wird kompensiert durch eine an das Absorptionsgesetz angeglichene Veränderung der Heizwendelsteigung.

Der absorbierte Energiestrom wurde für verschiedene Durchmesser der Absorber in Abhängigkeit von deren Länge gemessen. Eine sich ergebende Differenz (die bei einem Absorberdurchmesser, der um 10 mm größer ist als der Strahldurchmesser, kleiner als 5 % ist) läßt sich auf gestreute Photonen zurückführen, wie durch eine Rechnung bestätigt wird.

Die Bestimmung des Energiestroms geschah durch eine Serie von Messungen mit Absorbern verschiedener Länge (5 bis 70 mm) und Extrapolation auf unendliche Länge. Es ergab sich dabei eine Energiestromdichte von 147 $\mu W/cm^2$ $\pm$ 5 %, die bei einem Abstand des Absorbers von 18 cm von der Quelle einer Quellenaktivität von (41,2 $\pm$ 2,1) Curie entspricht. Ein Vergleich dieses Ergebnisses mit den Ergebnissen der Messungen mit einer geeichten Ionisationskammer ergab Übereinstimmung innerhalb der Fehlergrenzen.

Gleichzeitig wurde bei diesen Energiestrommessungen der Absorptionskoeffizient von Blei und Quecksilber gewonnen. Als linearer Absorptionskoeffizient für Quecksilber ergab sich μ = 0,777 cm^{-1} $\pm$ 2 % und für den Massenkoeffizienten $\frac{\mu}{\rho}$ = 0,0583 $cm^2 \cdot g^{-1}$ $\pm$ 2 %. Ein Vergleich mit bisher bekannten Absorptionskoeffizienten anderer Elemente mit benachbarten Ordnungszahlen zeigt eine gute Übereinstimmung.

Mit Wasser wurden Absorptionsmessungen in der Weise durchgeführt, daß die Energie hinter Wasserschichten verschiedener Dicke kalorimetrisch mit einem Bleiabsorber bestimmt wurde. Auf Grund dieser Methode der energieunabhängigen Messung aller die Wasserschichten in Vorwärtsrichtung verlassenden Photonen und Elektronen konnte die räumliche Verschiebung zwischen der Schwächung des Primärstrahls und der Wirkung der dabei erzeugten Elektronen experimentell gezeigt werden.

Anhang

Aufbau und elektrische Schaltung zum Bleitresor für ein Kobalt-60-Präparat der Aktivität von ca. 50 Curie.

Die Stärke des zu verwendenden Präparates war im wesentlichen begrenzt durch den Aufwand für die Abschirmung des Aufbewahrungstresors. Es zeigte sich, daß die Grenze bei

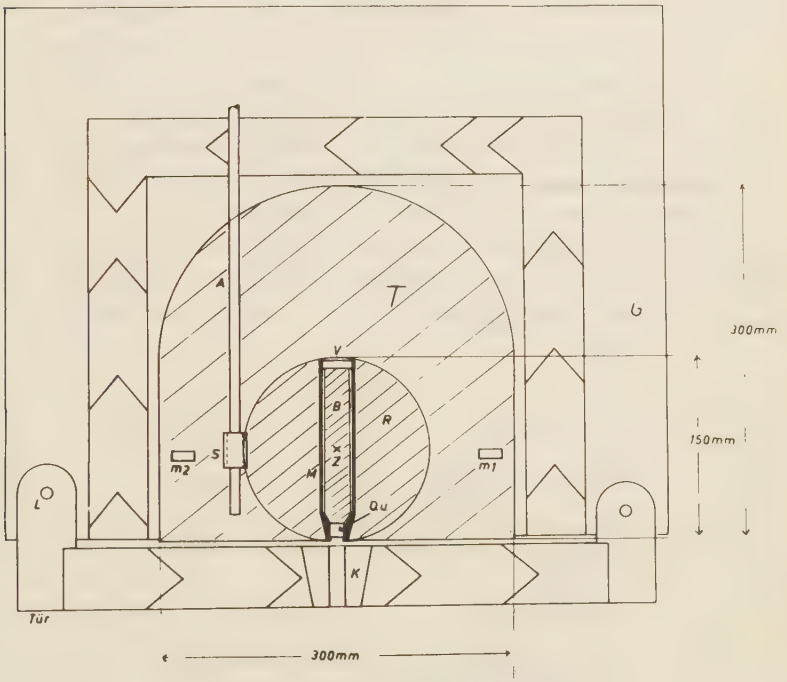


Abb. 18 Skizze des Bleitresors für ein Kobalt-60-Präparat mit einer Aktivität von ca. 50 Curie.
G = Grundplatte, die auf einem Wagen mit 700 kg Tragkraft ruht, T = Bleitresor von 300 mm Höhe und 300 mm Durchmesser, umgeben von einer U-förmigen Abschirmung aus Bleibausteinen. L = Drehpunkt der an G befestigten Tür, die ebenfalls mit Bleibausteinen ausgefüllt ist, Z = Drehachse des Rotors R, M = Messingrohr, das sich in einer horizontalen Bohrung des Rotors befindet, Qu = Quelle, B = Bleistempel, V = Verschluß des Rohres M, A = Antriebsachse; treibt den Rotor über die Schnecke S und ein Schneckenrad, das auf der Achse Z sitzt, an. m_1 und m_2 = Mikroschalter, die durch einen an Z befestigten Schwenkarm geschaltet werden, wenn die Quelle in Ruhe- oder Arbeitsstellung ist.

ca. 50 Curie lag. Dabei ist der vom Präparat ausgehende Energiefluß, wie er auch in Kapitel 4.5 gemessen worden ist, noch nicht sehr groß, so daß es wünschenswert war, mit dem Kalorimeter möglichst dicht an die Quelle heranfahren zu können. Das ließ einen Drehtresor ratsam erscheinen, mit dem das Präparat in zwei Stellungen gefahren werden kann. In der in Abbildung 18 gezeigten Stellung (Arbeitsstellung) kann man Bestrahlungen, wenn die um L schwenkbare Tür geöffnet ist, in einem Abstand von nur wenigen Millimetern von der Strahlenquelle durchführen. In der Ruhestellung d.h. nach Schwenkung des Rotors R um die Achse Z um 180°, ist die Quelle allseitig von mindestens 150 mm Blei umgeben (bei geschlossener Tür sogar von 200 mm), so daß dann auch in direkter Nähe des Tresors gearbeitet werden kann. Die schwenkbare Tür und der U-förmige Rahmen um den Tresor bestehen aus 50 mm starken Bleiziegeln. Das Schwenken des Rotors R erfolgt über ein Schneckengetriebe S. Zwischen Motor und Getriebe

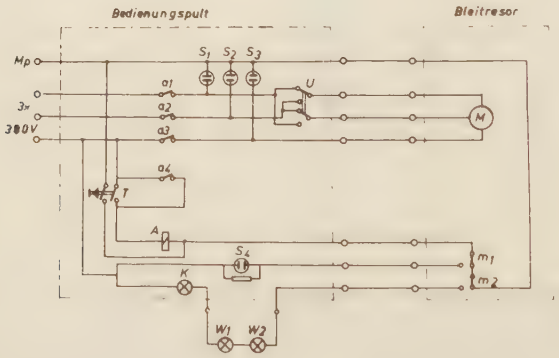


Abb. 19 Schaltung der Fernbedienung für den Bleitresor S_4 = Kontrollampe; leuchtet auf, wenn Quelle in Ruhestellung (d.h. m_1 geschaltet). K = Kontrollampe; leuchtet auf, wenn Quelle in Arbeitsstellung (d.h. m_2 geschaltet). W_1 und W_2 Warnlampen in Raum 007 und auf dem Flur, die zusammen mit K aufleuchten, U = Umschalter für Drehrichtung des Motors M, S_1, S_2, S_3 = Kontrollampen für die drei Phasen des Drehstrommotors, A = Relais, a_1 - a_4 = Relaiskontakte, T = Doppeltaste.

befindet sich eine Rutschkupplung. An der Rotorachse sitzt ein Schwenkarm, der durch Endabschalter m_1 und m_2 in den beiden Stellungen den Motor abschaltet; dabei wird das Nachlaufen des Motors durch die Rutschkupplung abgefangen. Da bei ausgefahrener Quelle im Meßraum außerhalb der Strahlrichtung der Streustrahlungspegel sehr hoch war, erfolgte die Bedienung des Tresors aus einem anderen Raum. Die Schaltung der Fernbedienung zeigt Abbildung 19.

Literaturverzeichnis

[1] Le PAPE, M., ENGELMANN, J., CEA-Bibl. 25, 1963

[2] KRUGLOV, S.P., Sov. Phys. - Techn. Phys. 3 (1959) 2120 - 2131

[3] JAECKEL, R., Kleinste Drucke, ihre Messung und Erzeugung, Berlin 1950

[4] Handbuch der Physik Bd. XVI, Berlin 1927

[5] Valvo-Handbuch, Einzelteile I, 1961/62, S. 289 - 353

[6] KRUGLOV, S.P., LOPATIN, I.V., Sov. Phys. - Techn. Phys. 5 (1960) 395 - 401, 7 (1963) 1031 - 1035, Instr. Exp. Techn. (1963) 637 - 642

[7] GEISLER, M., BRUNNER, G., Atomkernenergie 7 (1962) 60 - 64

[8] DAVISSON, C.M., EVANS, R.D., Phys. Rev. 81 (1951) 404 - 411

[9] WYARD, J.J., Proc. Phys. Soc. A 66 (1953) 382 - 390

[10] GRODSTEIN, G.W., NBS Circular Nr. 583, Washington D.C. 1957

[11] JOHNS, M.E., Physics of Rad. Therapy, Springfield, Ill. 1953

[12] LAUGHLIN, J.S., BEATTIE, J.W., Rev. Sci. Instr. 22 (1951) 572 - 574

[13] EDWARDS, P.D., KERST, D.W., Rev. Sci. Instr. 24 (1953) 490 - 495

[14] Mc ELHINNEY, J., ZENDLE, B., DOMEN, S., J. Res. Nat. Bur. Stand. 56 (1956) 9 - 16

[15] KRUGLOV, S.P., Sov. Phys. - Techn. Phys. 6 (1961) 795 - 803 und 1060 - 1067

[16] MYERS, O.E., Nucleonics 5 (Nov. 1949) 37 - 47

[17] MYERS, I.T., Rev. Sci. Instr. 29 (1958) 758 - 761

[18] MYERS, I.T., Le BLANCH, W.M., FLEMING, D.M., Rev. Sci. Instr. 32 (1961) 1013 - 1015

[19] PRUITT, J.S., DOMEN, S.R., J. Res. Nat. Bur. Stand. 66A (1962) 371 - 380

Diese Arbeit wurde durchgeführt im I. Physikalischen Institut der Freien Universität Berlin unter Anleitung seines Direktors, Herrn Prof. Dr. H. Lassen.

Ich danke Herrn Prof. Lassen für die Überlassung des Themas und für die stetigen Anregungen und sein förderndes Interesse im Verlaufe dieser Arbeit.

Lebenslauf

Am 15. 2. 1935 wurde ich, Bernhard Rassow, als Sohn des Diplom-Ingenieurs Horst Rassow und seiner Ehefrau Eva geb. Thum in Berlin geboren. In der Zeit von 1943 bis 1954 besuchte ich verschiedene Schulen in Berlin-Friedenau, Angerburg (Ostpr.), Delitzsch (Sachsen-Anhalt) und Berlin-Wilmersdorf. Im Frühjahr 1954 bestand ich an der Friedrich-Ebert-Schule in Berlin-Wilmersdorf die Reifeprüfung und arbeitete anschließend ein halbes Jahr als technischer Praktikant bei den Askania-Werken in Berlin-Friedenau. Im Wintersemester 1954/55 wurde ich an der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Freien Universität Berlin für die Fachrichtung Physik immatrikuliert. Nach 9semestrigem Studium legte ich vor dem Wissenschaftlichen Landesprüfungsamt Berlin das Staatsexamen in den Fächern Physik und Chemie ab. Die schriftliche Hausarbeit hatte zum Thema: "Dosimetrie von Gammastrahlen mit der Ionisationskammer". Im Herbst 1960 begann ich im I. Physikalischen Institut der Freien Universität mit den Arbeiten an einem Absorptionskalorimeter für Photonenstrahlen, deren Ergebnis hiermit vorgelegt wird. Seit dem Sommersemester 1958 war ich studentische Hilfskraft am I. Physikalischen Institut, und im Januar 1961 wurde ich mit der Wahrnehmung der Stelle eines wissenschaftlichen Assistenten beauftragt. Seit April 1961 bin ich verheiratet.

Meine akademischen Lehrer waren die Professoren und Dozenten: E. Cassirer, A. Dinghas, G. Engel, H. Gollwitzer, G. Grawert, R. Honerjäger, K. Hübner, K.F. Jahr, K. Kanthack, H. Lassen, W. Lautsch, F.W. Levi, G. Ludwig, E. May, G. Müller, J. Müller, G. Ormanns, H.H. Ostmann, M. Päsler, R. Ritter, W. Stein, K. Überreiter, W. Weischedel.